



IFW  
A36204 - 066340.0186  
PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant : Holger Heuermann  
Serial No. : 10/810,417 Examiner : (Not Yet Assigned)  
Filed : March 26, 2004 Group Art Unit: 2858  
For : CALIBRATION METHOD FOR CARRYING OUT MULTIPORT  
MEASUREMENTS ON SEMICONDUCTOR WAFERS

CLAIM FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. §119

I hereby certify that this paper is being deposited  
with the United States Postal Service as first class mail in  
an envelope addressed to: Commissioner for Patents, P.O.  
Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450.

July 29, 2004  
Date of Deposit

Paul D. Ackerman  
\_\_\_\_\_  
Attorney Name

39,891  
\_\_\_\_\_  
PTO Registration No

  
\_\_\_\_\_  
Signature

July 29, 2004  
\_\_\_\_\_  
Date of Signature

Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Dear Sir:

A claim for priority is hereby made under the provisions of 35 U.S.C. §119 for the above-  
identified U.S. patent application based upon German Patent Application No. 103 14 463.3 filed  
March 28, 2003. A certified copy of this German application is enclosed.

Respectfully submitted,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Paul D. Ackerman", written over a horizontal line.

Paul D. Ackerman  
Patent Office Reg. No. 39,891

Attorney for Applicant  
212 408-2585

Enclosure



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 103 14 463.3

**Anmeldetag:** 28. März 2003

**Anmelder/Inhaber:** SUSS MicroTec Test Systems GmbH,  
01561 Thiendorf/DE

**Bezeichnung:** Kalibrierverfahren zur Durchführung von  
Mehrtormessungen auf Halbleiterscheiben

**IPC:** G 01 R 35/00

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der  
ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 4. März 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag



1

**LIPPERT, STACHOW, SCHMIDT & PARTNER**

Patentanwälte · European Patent Attorneys · European Trademark Attorneys

Krenkelstraße 3 · D-01309 Dresden

Telefon +49 (0) 3 51.3 18 18-0

Telefax +49 (0) 3 51.3 18 18 33

Ad/h1

28. März 2003

5 **SUSS MicroTec Test Systems GmbH**01561 Sacka10 **Kalibrierverfahren zur Durchführung von Mehrformmessungen auf Halbleiterscheiben**

15 Stand der Technik

Vektorielle Netzwerkanalysatoren (VNA) dienen der präzisen Vermessung von elektronischen Bauteilen und Komponenten sowie aktiven und passiven Hochfrequenzschaltungen und -baugruppen bis hin zu Antennen.

20

Es werden die so genannten Streuparameter von n-Toren ( $n=1,2, \dots$ ) detektiert, die ggf. in  $2n$ -Pol-Parameter (z.B. Z- oder Y-Parameter) umgerechnet werden.

25

Eine so genannte Systemfehlerkorrektur sorgt dafür, dass präzise Messungen mit VNA überhaupt durchführbar sind. Die Messgenauigkeit von VNA wird bei modernen Geräten fast ausschließlich von der Realisierbarkeit der für die Systemfehlerkorrektur notwendigen Kalibrierstandards beeinflusst.

30

Bei der Systemfehlerkorrektur werden innerhalb des so genannten Kalibriervorganges Messobjekte, die teilweise oder ganz bekannt sind, im Reflexions- und/oder Transmissionsverhalten vermessen [1].

Aus diesen Messwerten erhält man über spezielle Rechenverfahren Korrekturdaten (sog. Fehlergrößen oder -koeffizienten). Mit diesen Korrekturdaten und einer entsprechenden Korrekturrechnung bekommt man für jedes beliebige Messobjekt Messwerte, die von Systemfehlern des VNA und der Zuleitungen (Verkopplungen = Übersprecher, Fehlanpassungen = Reflexionen) befreit sind.

Die in der Hochfrequenztechnik übliche Beschreibungsform des elektrischen Verhaltens von Komponenten und Schaltungen erfolgt über die Streuparameter (auch S-Parameter). Sie verknüpfen nicht Ströme und Spannungen miteinander, sondern Wellengrößen. Diese Darstellung ist den physikalischen Gegebenheiten besonders angepasst.

Bild 1 zeigt ein Zweitor, das durch seine Streumatrix [S] gekennzeichnet sei. Die Wellen  $a_1$  und  $b_1$  seien die auf das Zweitor zulaufenden Wellen,  $b_1$  und  $b_2$  entsprechend die in umgekehrter Richtung sich fortpflanzenden Wellen. Es gilt die Beziehung:

20

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}}_{=[S]} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

Ein bekanntes Kalibrierverfahren für ein Zweitormodell mit 10 bzw. 12 Fehlergrößen ist das so genannte 10-Term- bzw. 12-Term-Verfahren [1]. In der amerikanischen Literatur wird es auch als SOLT (S: Short, O: Open, L: Load = Match, T: Thru) und in Europa als TMSO bezeichnet. Es ist das einzige Systemkalibrierverfahren für Zweitor-Netzwerkanalysatoren mit lediglich drei Messstellen.

Bei diesem in der Praxis am Häufigsten eingesetzte TMSO-Kalibrierverfahren müssen zunächst die beiden Messtore verbunden werden (T = Thru). Danach muss man an jedem Messtor drei bekannte Eintore, z.B. Wellensumpf (M = Match), Kurzschluss (S = Short)

und Leerlauf (0 = Open) kontaktieren und vermessen.

Das Mehrtor-Messproblem besteht darin, dass alle Messtore über das Messobjekt miteinander verkoppelt sind. Man erhält somit nicht mehr an einer Messstelle ein Maß für die hinlaufende, an der  
5 nächsten ein Maß für die reflektierte und letztlich an einer weiteren ein Maß für transmittierte Welle, das von den Abschlüssen des Mehrtores unabhängig ist, sondern man muss zusätzlich die Reflexionseigenschaften der anderen Messtoren im Modell berücksichtigen.

10

Das allgemeine Problem von n-Toren wird in der weiteren Diskussion der Übersicht halber auf 3 Tore reduziert, so wie es auch in Bild 2 dargestellt ist. DUT steht für die englische Bezeichnung des Messobjektes (Device Under Test).

15

Für dieses Mehrtor-Messproblem wurden in den letzten Jahren einige Lösungen publiziert und patentiert. Die Lösung des Mehrtor-Messproblems von Ferrero [2] benötigt einen NWA mit ebenfalls  $2n$  Messstellen bei gleichem Aufwand an Kalibrierstandards wie das TMSO-Verfahren. Demzufolge sind die

20

Anforderungen an die Hardware der Kalibrierstandards im Gegensatz zu dem hier vorgeschlagenen Lösungsweg erheblich aufwendiger. Ebenfalls müssen bei dem Verfahren von Ferrero sämtliche Kalibrierstandards vollständig bekannt sein. Des weiteren basiert

25

das Ferrero-Verfahren ausschließlich auf dem 7-Term-Prinzip, was dem Fall deutliche Messfehler zur Folge hat, da vollständig bekannte Standards nicht perfekt realisierbar sind und das 7-Term-Prinzip wesentlich empfindlicher auf derartige Modellfehler reagiert, als das hier eingesetzte 10-Term Verfahren ([3]).

30

Bei weiteren Verfahren ist der Erfinder Mitglied der Erfindergemeinschaft [4, 5]. Bei den 10-Term-Verfahren nach [4] müssen, genauso wie bei dem TMSO-Verfahren und dem Verfahren von Ferrero, sämtliche Kalibrierstandards bekannt sein. Vorteilhaft

an diesen 10-Term-Verfahren ist, dass lediglich VNA mit  $n+1$  anstatt  $2n$  Messstellen benötigt werden.

Die Multiport-7-Term-Verfahren nach [5], die auf eine Adaption der bekannten Zweitor-Verfahren auf ein Multiport-Verfahren  
5 bauen und somit die Verfahren TAN, TNA, LAN, TRL, TLR, LLR, LRL, TAR, TMR, TRM, TMS, IMS, TMO, LMO, UMSO, TMN, LNN, TZU, TZY, TYU, LZY, ZZU, YYU, QSOLT (z.B. in [3]=ISBN 3-8265-1495-5 und seit 1996 im Handel als Fachbuch erhältlich) beinhalten, benötigen i.d.R. lediglich  $n-1+2$  Kalibriermessungen,

10 Ein weiteres Verfahren des Unternehmens ATN wird in der amerikanischen Patentschrift US 5578932 beschrieben. Die Patentschrift [6] beschreibt im einzelnen ein sog. Testset, mit dem ein 2-Tor Netzwerkanalysator auf  $n$  Tore erweitert werden kann. Weiterhin wird eine spezielle Kalibriereinrichtung  
15 beschrieben, die für die automatische Kalibrierung dieses Testsets benötigt wird.

Die Kalibriereinrichtung enthält neben den Standards Open, Short und Match (auch Termination) eine Anordnung  
20 verschiedener Transmissionsleitungen, die über Halbleiterschalter zwischen die Anschlüsse der Kalibriereinrichtung geschaltet werden können. Somit müssen alle Standards wie beim TMSO-Verfahren vollständig bekannt sein. Im Gegensatz zur Aussage im Abstract findet jedoch keine  
25 vollständige Mehrportkalibrierung und -fehlerkorrektur statt. Statt dessen werden nur Zweitor-Pfade kalibriert, die restlichen Tore werden nicht berücksichtigt (Spalte 18, Zeile 57). Im späteren Messbetrieb werden nacheinander Zweitor-Messungen durchgeführt. Dabei werden die in der Kalibrierung nicht  
30 eingeschlossenen Messtore nacheinander durch innerhalb des Testsets eingebaute unterschiedliche Reflexionsstandards abgeschlossen. Für jeden Wert des Reflexionsstandards wird genau eine 2-Tor-Messung durchgeführt (Spalte 21, Zeile 1). Nachdem die Messungen an allen Messtoren durchgeführt wurden, kann aus den

erhaltenen Messwerten und den bekannten Werten der Reflexionsstandards ein um die systematischen Fehler korrigiertes Ergebnis berechnet werden. Für die Vermessung eines 3-Tor-Prüfobjektes sind laut Patentschrift 2 Zweitor-Messungen von Tor 1 nach Tor 2 und von Tor 1 nach Tor 3 notwendig (Spalte 21, Zeile 1 und Zeile 45), wobei zur vollständigen Charakterisierung aller Parameter das nicht eingeschlossene dritte Tor des Prüfobjektes bei der Messung von Tor 1 nach Tor 2 durch mindestens 3 unterschiedliche Reflexionsstandards abgeschlossen werden muss (Spalte 21, Zeile 28). Dies bedeutet, dass zur vollständigen Charakterisierung eines 3-Tores  $3 + 1 = 4$  Zweitor Messungen erforderlich sind, während das hier vorgestellte Verfahren mit 3 Zweitor Messungen auskommt.

### 2.3. Erzielbare Vorteile

Die in den Ansprüchen 1-4 angegebenen Erfindungen haben alle gemein, dass diese Verfahren insbesondere in Hinblick auf die Randbedingungen von Halbleiter-Messungen (On-Wafer-Messungen) optimiert sind.

Im Halbleiterbereich ist es nicht unüblich, dass Anwender auf den Wafern selbst die Kalibrierstandards realisieren. Die geometrische Reproduzierbarkeit und Gleichheit von derartig selbst gefertigten Kalibrierstandards ist sehr hoch. Vorteilhaft ist auch, dass sich die Kalibrierstandards auf dem gleichen Substratträger (Halbleiter) befinden wie auch die Messobjekte. Neben den Vorteilen der geringen Verfahrenswerte können auch parasitäre Elemente sowie Übergangseffekte von der Messspitze zum Wafer „herauskalibriert“ werden. Jedoch werden die elektrischen Eigenschaften nur in guter Näherung realisiert. Insbesondere der Reflexionsstandard Leerlauf lässt sich nicht mit der notwendigen Güte herstellen. Hier bieten die unter den Ansprüchen 1-2 vorgestellten RRMT-Verfahren und die in den



Ansprüchen 3-4 vorgestellten Multi-Port-LRRM-Verfahren die Vorteile, dass die Kalibrierstandards nicht exakt bekannt sein müssen. Folglich lassen sich mit diesen Verfahren und von Anwendern selbst gefertigten Kalibrierstandards Mehrtor-Messungen mit sehr hoher Präzision und sehr geringen Kosten für die Kalibrierstandards durchführen. Bereits in der Vergangenheit wurde das LRRM-Verfahren von dem amerikanischen Unternehmen Cascade als hochspezielles Zweitor-Kalibrierverfahren für On-Wafer-Messungen eingesetzt.

10

Nunmehr ist man mit der angegebenen Erfindung in der Lage, hochpräzise n-Tor-Messungen auf Halbleiterschaltungen durchzuführen.

15

Die Verfahren RRMT und Multi-Port-LRRM zeichnen sich aufgrund der Tatsache, dass neben den bzw. dem Impedanzstandard(s) zwei Reflexionsstandards vermessen werden, aus. Dieses ist aufgrund des Mehraufwandes in der koaxialen Messtechnik eher ein Nachteil.

20

Jedoch bei On-Wafer-Messungen, die zu einem beträchtlichen Teil vollautomatisch ablaufen, helfen diese zusätzlichen Informationen, die Qualität der Messung zu verbessern. Sämtliche Verfahren dieser Erfindung zeichnen sich dadurch aus, dass sie alle Leitungen für die Verbindungen der Messtore verwenden. Bei On-Wafer-Messungen lassen sich im Gegensatz zu koaxialen Messungen die Messtore (On-Wafer-Messspitzen (Probes)) nicht unmittelbar verbinden. Deshalb kann niemals ein echter Thru-Standard bei On-Wafer-Verfahren eingesetzt werden.

30

Die Impedanzstandards (M) lassen sich auf Halbleitern sehr genau beschreiben, variieren jedoch i.d.R. sehr stark bzgl. der Gleichstrom-Widerstandswerte. Derartige Schwankungen bei bekannten Gleichstrom-Widerstandswerten beeinflussen die Verfahren dieser Erfindung nicht, im Gegensatz zu den „klassischen“ Kalibrierverfahren, die für koaxiale Messungen

35

optimiert sind. Bei den klassischen Verfahren ist es notwendig, dass M-Standards mit möglichst identischem Reflexionsverhalten an jedem Messtor angeschlossen werden. Kann dieses nicht gewährleistet werden, wie es bei Mehrtor-On-Wafer-Messungen der Fall ist, da Standards im 90°-Winkel zueinander angeordnet werden müssen, so kommt es zu so genannten Verspannungen [3], die i.d.R. die Quelle für sehr große Messfehler sind.

Bei dieser Erfindung werden Netzwerkanalysatoren benötigt, die 2n-Messstellen aufweisen. Vom Kostenpunkt ist dieses nachteilig gegenüber dem Verfahren nach [4], das nur Netzwerkanalysatoren mit n-1 Messstelle benötigt. In der Praxis werden jedoch diese Verfahren nach [4] auch in 2n-Messstellen-VNA eingesetzt, da diese Maschinen deutlich präziser und langzeitstabiler arbeiten, weil Drifteffekte der elektronischen Umschalter keinen Einfluss auf die Messqualität haben.

Im On-Wafer-Messbereich spielen die höheren Kosten für 2n-Messstellen-Maschinen keine große Rolle, da diese Kosten nur einen Bruchteil der Kosten des Gesamtsystems ausmachen.

#### 2.4. Weitere Ausgestaltung der Erfindung

Die vier Verfahren, die in dieser Erfindung unter den Ansprüchen 1-4 angemeldet werden, unterscheiden sich bei der Durchführung nur um Nuancen, die sich jedoch in der Praxis deutlich auswirken können. Den größten Unterschied gibt es zwischen den RRMT-Verfahren unter den Ansprüchen 1 und 2 und den Mehrtor-LRRM-Verfahren unter den Ansprüchen 3 und 4. Bei den LRRM-Verfahren wird nur ein Match-Standard an einem (Referenz-) Tor kontaktiert und vermessen. Die Tatsache, dass die Eigenschaften des M-Standards zu den anderen Messtoren nur „übergerechnet“ wird, bewirkt, dass die Messgenauigkeit in diesem so genannten Anpassungspunkt ( $S_{11}=0$ ) an den anderen Toren schlechter ist als am Referenztor. In der Hochfrequenztechnik werden fast alle Schaltungen auf Anpassung optimiert!

Dieser Nachteil tritt bei beiden RRMT-Verfahren nicht auf. An jedem Tor wird ein Impedanzstandard, der sich mit keinem anderen Impedanzstandard gleichen muss, kontaktiert und vermessen.

- 5 Der Unterschied zwischen den beiden RRMT- bzw. Multiport-LRRM-Verfahren liegt in der Anzahl der T- bzw. L-Messungen. Bei den Verfahren nach Anspruch 1 und 3 benötigt man  $k$  Messungen und somit mehr als bei den Verfahren nach den Ansprüchen 2 und 4 ( $n-1$ ). Die Verfahren nach Anspruch 1 und 3 zeichnen sich wiederum
- 10 durch eine größere Robustheit aus. So kann man z.B. zeigen, dass die Transmissionsmessdynamik bei den Verfahren 1 und 3 der des Gerätes entspricht. Hingegen gibt es bei den Verfahren den Ansprüchen nach 2 und 4 eine deutlich größere Sensibilität bezüglich kleiner Kontaktierungsfehler und Unvollkommenheiten
- 15 in den Kalibrierstandards. Deshalb wird mit diesen Verfahren in der Praxis nicht die Messdynamik des Netzwerkanalysators erreicht.

- 20 Folglich wird man die Verfahren nach 2 und 4 erst einsetzen, wenn die Anzahl  $n$  der Messtore unverhältnismäßig groß ist.

- Mit derartig geringen Ansprüchen an die Kalibrierstandards lassen sich die erfindungsgemäßen Mehrtorkalibrierverfahren auch ausgezeichnet für automatisierte Kalibrierungen von VNA in
- 25 koaxialen Umgebungen einsetzen. Für Zweitor-Kalibrierungen werden Algorithmen und zugehörige Schaltnetzwerke bereits von mehreren Herstellern vertrieben. Bei Multiport-Kalibrierungen ist die Anzahl der Kontaktierungen der Kalibrierstandards merklich größer, was Zeit und Geld kostet und größere Fehlerrisiken in sich birgt.

- 30 2.4. Beschreibung der Mehrtorverfahren

Als Blockschaltbild ist der interessante Sonderfall eines 3-Tor Netzwerkanalysesystems im Bild 2 illustriert. Man erkennt, dass

2n=6 Messstellen (15) notwendig sind. Das Bild 2 zeigt auf, wie ein derartiger Aufbau zu realisieren ist und dient als Grundlage für die Beschreibung der Mehrtorverfahren.

5 Im Bild 2 wird dargestellt, wie das Signal einer Quelle 17 über einen Umschalter 16, dessen Eigenschaften (Reproduzierbarkeit, Reflexion, Langzeitstabilität usw.) nicht in die Messgenauigkeit eingehen, auf die drei Zweige 18, 19 und 20 geleitet wird. Die als ideal angenommenen Messstellen 15 nehmen jeweils ein Maß für die hinlaufende und transmittierte Welle auf.

10 Sämtliche deterministischen Nichtidealitäten und Unvollkommenheiten in Form von Fehlanpassungen und Übersprecher werden in den Fehlermatrizen 13, 14a und 14b zusammengefasst und berücksichtigt. An den Toren 10, 11 und 12 ist das Messobjekt 21 (DUT) mit dem vektoriellen Netzwerk-

15 analysator verbunden.

Die Verfahren lassen sich von der mathematischen Seite in drei Schritte unterteilen:

- 1.: die sog. Selbstkalibrierung,
- 2.: die sog. direkte Kalibrierung und
- 20 3.: die Systemfehlerkorrektur.

Beim ersten Schritt werden die unbekannten Parameter in den Kalibrierstandards berechnet. Hier werden Spur- und Determinanteneigenschaften von Abbildungsmatrizen ausgenutzt, wie auch in [3] nachzulesen ist. Im Gegensatz zu den sonstigen

25 Veröffentlichungen werden die Match-Kalibrierstandards nicht mit idealen Eigenschaften ( $S_{11}=0$ ) in der Mathematik berücksichtigt. Dieses führt dazu, dass die daraus resultierenden Gleichungen zur Berechnung der Reflexionswerte der beiden R-Standards deutlich länger sind, als in der Literatur angegeben. Jedoch

30 unterscheiden sich diese Gleichungen bzgl.

Eindeutigkeitsbetrachtungen nicht von den üblichen Lösungen der Selbstkalibrierrechnungen.

Für die Standards des RRMT- und des LRRM-Verfahrens gilt  
5 bzgl. der Eindeutigkeitsbetrachtungen:

1.: Die Phase des Reflexionsstandards R muss nur auf  $\pm 90^\circ$  bekannt sein. Mehr Informationen werden nicht benötigt. In der Praxis setzt man einen realen Kurzschluss und einen Leerlauf  
10 ein. Die Abweichungen zu einem idealen Kurzschluss oder Leerlauf haben keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

2.: Die Impedanzstandards M müssen vollständig bekannt sein. Diese können beim RRMT-Verfahren jedoch unterschiedlich sein.  
15 Derartige Standards werden oft auch als Transfer-Match [6] bezeichnet.

3.: Der Leitungsstandard L bei LRRM oder T bei RRMT muss vollständig bekannt sein, kann aber eine endliche Dämpfung und  
20 ggf. ein bekanntes Reflexionsverhalten aufweisen. Es können zwischen verschiedenen Messtoren auch unterschiedliche Leitungsstandards eingesetzt werden.

Beim zweiten Schritt der direkten Kalibrierung werden die Fehlerkoeffizienten berechnet. Dies geschieht für das RRMT-  
25 Verfahren nach Anspruch 1 und für das LRRM-Verfahren nach Anspruch 3 auf „klassischen“ Wegen der 10-Term-Verfahren, wie diese bereits in [1,3] beschrieben wurden. Man führt für jede Durchverbindung eine Zweitorkalibrierung durch und kennt die Fehlerkoeffizienten für diese Verbindung. Der Weg zur Behandlung  
30 des Multiport-Verfahrens wird dann als dritter Schritt beschrieben.

Für die Verfahren nach Anspruch 2 und 4 werden Wege der 7-Term-Verfahren zur Berechnung der Fehlerkoeffizienten bereits  
35 in [3] für ähnliche Zweitor-Verfahren beschrieben. Die

Zusammenführung dieser Resultate der Zweitor-Verfahren in ein Multiport-Verfahren wird ebenfalls im nächsten Schritt dargestellt.

Beim dritten Schritt zur Durchführung einer Systemfehlerkorrektur werden die Messdaten eines unbekannten Messobjektes von den Fehlern des VNA und den Zuleitungen korrigiert. Für die Verfahren nach Anspruch 1 und 3, die auf dem 10-Term-Prinzip basieren: Die Ausgangsbasis für die mathematische Beschreibung der 10-Term Mehrtorverfahren (oft auch Multiportverfahren genannt) bildet das Fehlermodell im Bild 2. Der Einfachheit halber wollen wir die mathematische Herleitung nur für den in der Praxis interessantesten Fall, die Vermessung von Dreitoren, durchführen. Die Verallgemeinerung dieser Vorgehensweise zu n-Toren kann auf einfache Art und Weise durchgeführt werden, indem man einen Umschalter mit n Ausgangstoren vorsieht und für jedes weitere Tor des Messobjektes eine zusätzliche Messstelle berücksichtigt.

Zur Ermittlung der klassischen Fehlermatrizen des 10-Term Modells wird eine Zweitorkalibrierung zwischen jeder Messtorkombination mit den Fehlermatrizen  $[A]$ ,  $[F]$  und  $[G]$  durchgeführt. Es gilt:  $[F] = [B_I]^{-1}$  und  $[G] = [B_{II}]^{-1}$ .

Für die Schalterstellung I ist die Fehlermatrix  $[A]$  das Referenztor, das drei Fehlergrößen enthält, für II ist es  $[F]$  und für III  $[G]$ . Die für jede Schalterstellung zwei anderen Messtoren enthalten nur die zwei Fehlergrößen (z.B.;  $F_T$ ,  $F_L$ ) des Transmissionsfehlernetzwerkes. Die zugehörigen Größen sollen im weiteren abhängig von der Schalterstellung einfach, zweifach und dreifach gestrichen werden. Für den Dreitorfall ergeben sich somit  $3 \cdot 3 + 3 \cdot 2 \cdot 2 = 21$  Fehlergrößen.

Die Korrekturrechnung der Messwerte des Messobjektes ( $m_i$ ) unter Verwendung der 21 Fehlergrößen lässt sich wie folgt ansetzen:

12

$$\begin{pmatrix} m'_2 \\ a'_1 \end{pmatrix} = [A'] * \begin{pmatrix} m'_1 \\ b'_1 \end{pmatrix}, \quad b'_2 = m'_4 / F'_7, \quad (2)$$

$$a'_2 = F'_1 * b'_2, \quad b'_3 = m'_6 / G'_7, \quad a'_3 = G'_7 * b'_3, \quad (3)$$

Nach Umstellung erhält man 6 Gleichungen für die 6 Wellengrößen  $a'_1, a'_2, a'_3, b'_1, b'_2, b'_3$ .

- 5 Genauso verfährt man für die übrigen Schalterstellungen. Diese 3\*6 Gleichungen lassen sich in der Gleichung

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & Sx & \\ & & \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

- 10 einsetzen. Hierbei bekommt man für jede Schalterstellung die Werte einer Matrixspalte, was letztlich zu einem linearen Gleichungssystem bestehend aus zwei  $n*n$  Messwertmatrizen und der  $n*n$  Streumatrix führt. Löst man dieses Gleichungssystem nach der  $[Sx]$ -Matrix auf, so stehen die fehlerkorrigierten Streuparameter eines  $n$ -Tores zur Verfügung.

- 15 Für die Verfahren nach Anspruch 2 und 4, die auf dem 7-Term-Prinzip basieren: Die Ausgangsbasis für die mathematische Beschreibung der 7-Term Mehrtorverfahren (oft auch Multiportverfahren genannt) bildet ebenfalls das Fehlermodell im Bild 2. Der Einfachheit halber wollen wir die mathematische Herleitung nur für den in der Praxis  
20 interessantesten Fall, der Vermessung von Dreitoren, durchführen. Die Verallgemeinerung dieser Vorgehensweise zu  $n$ -Toren kann auf einfache Art und Weise durchgeführt werden, indem man einen Umschalter mit  $n$  Ausgangstoren vorsieht und für jedes weitere Tor des Messobjektes zwei zusätzliche  
25 Messstellen berücksichtigt.

Zur Ermittlung der klassischen Fehlermatrizen des 7-Term Modells wird eine Zweitorkalibrierung zwischen dem Referenztor mit der Fehlermatrix  $[A]$  und den Fehlermatrizen  $[B_i]$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) durchgeführt. Die Bezeichnung 7-Term Modell rührt von der Tatsache, dass die zugehörigen  $2 \times 2$  Fehlermatrizen  $[A]$  und  $[B_i]$  insgesamt 7 Fehlerterme enthalten, da immer eine der 8 enthaltenen Größen auf 1 gesetzt werden kann.

Im Weiteren ist es vorteilhaft, die mathematische Formulierung des Zweitormodells in der inversen Form der angegebenen Transmissionsparameter anzusetzen:

$$[G] = [A]^{-1} \quad , \quad [H_i] = [B_i]^{-1} \quad , \quad i=1,2 \quad (2)$$

wobei für die Ein- und Ausgänge an den Fehlernetzwerken

$$\begin{pmatrix} b_i \\ a_i \end{pmatrix} = [G] * \begin{pmatrix} m_i \\ m_2 \end{pmatrix} \quad , \quad \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \end{pmatrix} = [H_i] * \begin{pmatrix} m_{2i-1} \\ m_{2i} \end{pmatrix} \quad (3)$$

gilt. Diese Gleichungen lassen sich nach den  $a_i$  und  $b_i$  Wellengrößen auflösen und in der Gleichung



14

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & Sx & \\ & & \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

einsetzen. Hierbei bekommt man für jede Schalterstellung die Werte einer Matrixspalte, was letztlich zu einem linearen Gleichungssystem bestehend aus zwei  $n \times n$  Messwertmatrizen und der  $n \times n$  Streumatrix führt. Löst man dieses Gleichungssystem nach der  $[Sx]$ -Matrix auf, so stehen die fehlerkorrigierten Streuparameter eines  $n$ -Tores zur Verfügung.

10

15

20

25

30

**Literatur**

- [1] Schick, B., Messsysteme der Hochfrequenztechnik, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1984 ISBN ????
- 5 [2] Ferrero, A., Pisani, U., Kerwin, K.J., A New Implementation of a Multiport Automatic Network Analyzer, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, Nov. 1992, pp. 2078-2085
- 10 [3] Heuermann, H., Sichere Verfahren zur Kalibrierung von Netzwerkanalysatoren für koaxiale und planare Leitungssysteme, Dissertationsschrift, Institut für Hochfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1995, ISBN 3-8265-1495-5
- 15 [4] Heuermann, H., Fabry, H.-J., Ballmann, R., Kalibrierverfahren zur Durchführung von Mehrformmessungen basierend auf den 10-Term-Verfahren, Patentantrag P 198 18 878.1-35 am 06.05.98
- [5] Heuermann, H., Fabry, H.-J., Ballmann, R., Kalibrierverfahren zur Durchführung von Mehrformmessungen basierend auf den 7-Term-Verfahren, Patentantrag P 198 18 877.3-35 am 06.05.98
- 20 [6] Adamian, V., Method and Apparatus for Providing and Calibrating a Multiport Network Analyzer, US Patent 5578932

**LIPPERT, STACHOW, SCHMIDT & PARTNER**

Patentanwälte · European Patent Attorneys · European Trademark Attorneys

Krenkelstraße 3 · D-01309 Dresden

Telefon +49 (0) 3 51 3 18 18-0

Telefax +49 (0) 3 51 3 18 18 33

Ad/hl

28. März 2003

- 5 **SUSS MicroTec Test Systems GmbH**  
**01561 Sacka**

- 10 **Kalibrierverfahren zur Durchführung von Mehrformmessungen auf  
Halbleiterscheiben**

**Bezugszeichenliste**

- |    |     |               |
|----|-----|---------------|
| 15 | 10  | Tor           |
|    | 11  | Tor           |
|    | 12  | Tor           |
|    | 13  | Fehlermatrize |
|    | 14a | Fehlermatrize |
| 20 | 14b | Fehlermatrize |
|    | 15  | Messstelle    |
|    | 16  | Umschalter    |
|    | 17  | Quelle        |
|    | 18  | Zweig         |
| 25 | 19  | Zweig         |
|    | 20  | Zweig         |
|    | 21  | Messobjekt    |

21

17

**LIPPERT, STACHOW, SCHMIDT & PARTNER**

Patentanwälte · European Patent Attorneys · European Trademark Attorneys

Krenkelstraße 3 · D-01309 Dresden

Telefon +49 (0) 3 51 3 18 18-0

Telefax +49 (0) 3 51 3 18 18 33

Ad/hl

28. März 2003

- 5 **SUSS MicroTec Test Systems GmbH**  
**01561 Sacka**

- 10 **Kalibrierverfahren zur Durchführung von Mehrformmessungen auf  
Halbleiterscheiben**

**Patentansprüche**

- 15 1. Verfahren zum Kalibrieren eines n Messtore und mindestens 2n  
Messstellen ( $n > 1$ ) aufweisenden vektoriellen Netzwerk-  
analysators durch aufeinander folgende Messung der Reflexions-  
und Transmissionsparameter an  $k = \text{Summe}(n-i)$  für ( $i=1, 2, \dots, n-1$ )  
oder  $n-1$  verschiedenen, zwischen den Messtoren in beliebiger  
20 Reihenfolge geschalteten planaren oder koaxialen Zweitor-  
Kalibrierstandards, die alle einen Transmissionspfad aufweisen  
müssen, und 3 verschiedenen zwischen den Messtoren in  
beliebiger Reihenfolge geschalteten planaren oder auch  
koaxialen n-Tor-Kalibrierstandards, die keine Transmission  
25 aufweisen dürfen, **dadurch gekennzeichnet, dass**

- a) die ersten k Kalibriermessungen an einem Zweitor, das  
mittels der direkten Verbindung der Messtore  
(Durchverbindung,  $T = \text{Thru}$ ) oder einer kurzen angepassten  
30 Leitung ( $L = \text{Line}$ ) bekannter Länge und Dämpfung  
realisiert ist, und das zwischen jeder möglichen  
Messtorkombination (k) angeschlossen wird, durchgeführt  
werden,

- b) eine weitere Kalibriermessung an einem n-Eintor, das  
35 mittels n bekannten ggf. unterschiedlichen Impedanzen

(z.B. so genannte Wellenabschlüsse mit  $50 \Omega$ ,  $M = \text{Match}$ ) realisiert ist, durchgeführt wird,

5 c) eine weitere Kalibrierung an einem n-Eintor, das mittels n unbekannter stark reflektierenden Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Kurzschlüssen ( $S = \text{Short}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird und

10 d) eine weitere Kalibrierung an einem n-Eintor, das mittels n unbekannter stark reflektierenden Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Leerläufen ( $O = \text{Open}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird.

2) Verfahren nach Anspruch 1, im Einsatz mit vorhandenen koaxialen oder planaren Kalibrierstandards, **dadurch gekennzeichnet, dass**

15 (a) die ersten n-1 Kalibrierungen an einem Zweitor, das mittels der direkten Verbindung der Messtore (Durchverbindung,  $T = \text{Thru}$ ) oder einer kurzen angepassten Leitung ( $L = \text{Line}$ ) bekannter Länge und Dämpfung realisiert ist, und das zwischen einem Referenzmesstor und den  
20 restlichen Toren (n-1) angeschlossen wird, durchgeführt werden.

(b) eine weitere Kalibrierung an einem n-Eintor, das mittels n bekannten ggf. unterschiedlichen Impedanzen (z.B. sog. Wellenabschlüsse mit  $50 \Omega$ ,  $M = \text{Match}$ ) realisiert  
25 ist, durchgeführt wird.

(c) eine weitere Kalibrierung an einem n-Eintor, das mittels n unbekannter stark reflektierender Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Kurzschlüssen ( $S = \text{Short}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird.

(d) eine weitere Kalibriermessung an einem n-Eintor, das mittels n unbekannter stark reflektierender Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Leerläufen ( $O = \text{Open}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird.

5 3) Verfahren nach Anspruch 1, wobei  $n > 2$  gilt, im Einsatz mit vorhandenen koaxialen oder planaren Kalibrierstandards, **dadurch gekennzeichnet, dass**

10 (a) die ersten k Kalibriermessungen an einem Zweitor, das mittels der direkten Verbindung der Messtore (Durchverbindung,  $T = \text{Thru}$ ) oder einer kurzen angepassten Leitung ( $L = \text{Line}$ ) bekannter Länge und Dämpfung realisiert ist, und das zwischen jeder möglichen Messtorkombination (k) angeschlossen wird, durchgeführt werden.

15 (b) eine weitere Kalibriermessung an einem Eintor, das mittels einer bekannten Impedanz (z.B. sog. Wellenabschluss mit  $50 \Omega$ ,  $M = \text{Match}$ ) realisiert ist, durchgeführt wird.

20 (c) eine weitere Kalibriermessung an einem n-Eintor, das mittels n unbekannter stark reflektierender Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Kurzschlüssen ( $S = \text{Short}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird.

25 (d) eine weitere Kalibriermessung an einem n-Eintor, das mittels n unbekannter stark reflektierender Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Leerläufen ( $O = \text{Open}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird.

4) Verfahren nach Anspruch 1, wobei  $n > 2$  gilt, im Einsatz mit vorhandenen koaxialen oder planaren Kalibrierstandards, **dadurch gekennzeichnet, dass**

30 (a) die ersten n-1 Kalibriermessungen an einem Zweitor, das mittels der direkten Verbindung der Messtore

(Durchverbindung,  $T = \text{Thru}$ ) oder einer kurzen angepassten Leitung ( $L = \text{Line}$ ) bekannter Länge und Dämpfung realisiert ist, und das zwischen einem Referenzmesstor und den restlichen Toren ( $n-1$ ) angeschlossen wird, durchgeführt werden.

5

(b) eine weitere Kalibrierungsmessung an einem Eintor, das mittels einer bekannten Impedanz (z.B. sog. Wellenabschluss mit  $50 \Omega$ ,  $M = \text{Match}$ ) realisiert ist, durchgeführt wird.

10

(c) eine weitere Kalibrierungsmessung an einem  $n$ -Eintor, das mittels  $n$  unbekannter stark reflektierender Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Kurzschlüssen ( $S = \text{Short}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird.

15

(d) eine weitere Kalibrierungsmessung an einem  $n$ -Eintor, das mittels  $n$  unbekannter stark reflektierender Abschlüsse ( $R = \text{Reflect}$ ), die Leerläufen ( $O = \text{Open}$ ) ähneln, realisiert ist, durchgeführt wird.

**LIPPERT, STACHOW, SCHMIDT & PARTNER**  
Patentanwälte · European Patent Attorneys · European Trademark Attorneys  
Krenkelstraße 3 · D-01309 Dresden  
Telefon +49 (0) 3 51.3 18 18-0  
Telefax +49 (0) 3 51.3 18 18 33

Ad/hl

28. März 2003

- 5 **SUSS MicroTec Test Systems GmbH**  
**01561 Sacka**

- 10 **Kalibrierverfahren zur Durchführung von Mehrformmessungen auf  
Halbleiterscheiben**

**Zusammenfassung**

- 15 Dargestellt wurde ein neues Verfahren zur Kalibrierung von  
Netzwerkanalysatoren. Dieses Multiportverfahren arbeitet mit den  
zwei Zweitor-Kalibrierverfahren RRMT und LRRM nach der 7-Term-  
Selbstkalibriertechnik zur Berechnung der Selbstkalibriergrößen R  
und der 10-Term- bzw. 7-Term-Kalibriertechnik zur Berechnung der  
20 Fehlerkoeffizienten. Für die  $n+2$  bzw.  $k+3$  benötigten  
Kalibriermessungen genügt es, wenn man über die üblichen  
Standards für die 7-Term-Verfahren (z.B. LMR oder TLR) verfügt.  
Hierbei steht T für eine Durchverbindung und M für eine bekannte  
Impedanz. Mit L bezeichnet man eine Leitung und mit R einen  
25 Reflexionsstandard, von dem die Phase der Reflexion nur auf  $\pm 90^\circ$   
bekannt sein muss.

- Dieses Kalibrierverfahren benötigt einen Netzwerkanalysator mit  
2\*n Messstellen und ist auch in Analysatoren mit mehr  
30 Messstellen anwendbar.

Mit diesen Verfahren können von Systemfehlern (wie  
Übersprecher, Fehlanpassungen) befreite Messungen sowohl auf  
Halbleitersubstraten (On-Wafer) als auch in koaxialen Systemen  
durchgeführt werden.

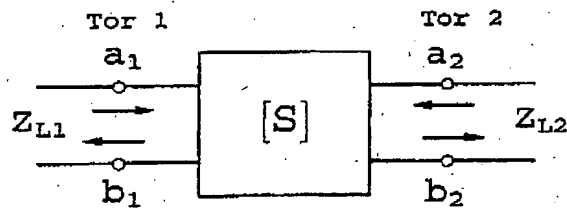


2

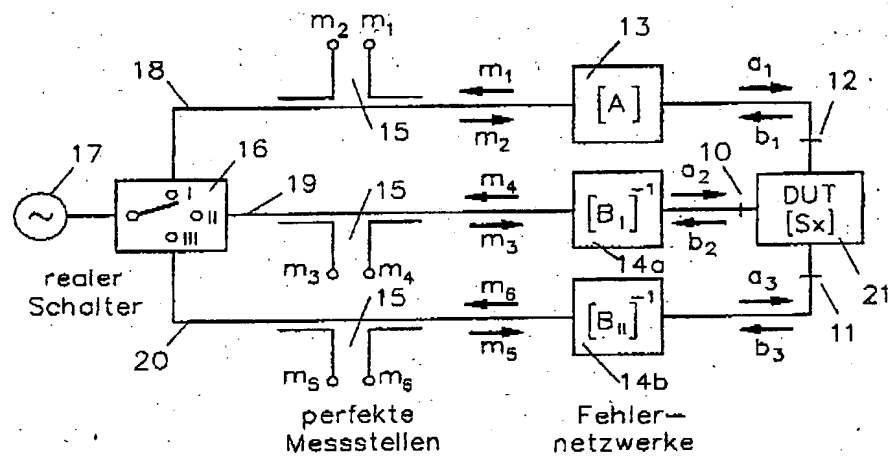
Dieses Kalibrierverfahren bietet ganz neue Perspektiven bei der Vermessung von Mehrtoren auf Halbleitersubstraten, da es den Einsatz von Kalibrierstandards erlaubt, die sich insbesondere auf Halbleitersubstraten sehr einfach fertigen lassen.

5

25



**Bild 1: Zur Erläuterung der Streumatrix**



**Bild 2: Blockschaltbild eines vektoriellen 3-Tor-Netzwerkanalysators mit 6 Messstellen**